

□ 기술애설 □

원자력응용 실시간 제어시스템

한국원자력연구소 차경호* · 권기춘**

● 목	차 ●
1. 서 론	4. 원자력응용 실시간 제어시스템 프로토타입 개발사례
2. 원자력응용 실시간 제어시스템 특징	4.1 계측제어 시험검증 설비
3. 관련 실시간 제어시스템	4.2 로봇 제어시스템
3.1 ISACS, Norway, Halden	4.3 실시간 주제어실 모의시스템
3.2 N4, France	5. 결 론
3.3 A-PODIA, Japan	

1. 서 론

원자력발전소는 자율형 이동체(autonomous vehicles), 고속전철시스템을 포함하는 교통시스템, 그리고 항공기 등과 함께 복잡한 엄격 실시간시스템(hard real-time system)으로 간주된다[1, 2, 5, 6, 8, 11-13]. 한편, 원자력발전소의 제어는 원자로 제어봉의 제어에서부터 밸브, 증기발생기의 수위제어, 그리고 주제어실에서의 운전원에 의한 제어 등 그 실시간 제어계층이 다양하다(그림 1). 이러한 특성으로 인하여 원자력발전소의 실시간 컴퓨터 제어

시스템 개발 및 구현에는 ultra-dependable, highly-dependable, 그리고 high availability system 요건 [1]을 동시에 적용해야 한다.

최근, 원자력응용 실시간 제어시스템은 주로 계측 및 자동제어시스템, 모니터링시스템, 그리고 로봇 제어시스템이 개발되어 왔으며, 컴퓨터 제어시스템의 개발에 경제적, 시간적 잇점으로 인하여 응용 소프트웨어 개발도구를 포함한 개방형 컴퓨팅 환경을 이용하는 응용들이 현격히 증가하고 있다.

최근, 개방형 컴퓨팅 환경이 원자력응용 실시간제어시스템의 개발에도 이용되며, 특히 실시간 시뮬레이터를 이용한 계측제어 시스템의 프로토타입의 개발 및 V & V(Verification & Validation)을 위한 계측제어 시험검증 설비, 주제어실의 인간-기계 연계시스템 연구를 위한 주제어실 모의(simulation), 그리고 모니터링시스템의 개발 및 시험평가(Test & Evaluation)가 대표적이라 하겠다[13-15, 17-22]. 제 2장에서는 원자력응용 실시간 컴퓨터 제어시스템의 주요 특징을, 제 3장에서는 한국원자력연구소에서 개발되는 개방형 실시간 컴퓨터 제어시스템 프로토타입을 소개하고, 제 4장에서 결어하였다.

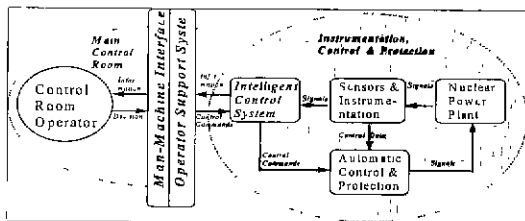


그림 1 원자력발전소의 실시간 제어시스템

*정 회 원

**중신회원

2. 원자력응용 실시간 제어시스템 특징

원자력 응용을 위한 실시간 제어시스템은 고신뢰도 (high Reliability), 엄격 실시간 (hard Real-time), 안전성 (Safety-critical), 높은 의존성 (high Dependability)의 특징을 갖는데, 이를 편의상 원자력응용 실시간 제어시스템의 "R²SD 특징"이라 정의한다. 현재까지 개발되어 온 원자력응용 실시간 제어시스템은 이러한 "R²SD 특징"을 실시간시스템의 개발요건으로 반영하여 왔으며, 최근에는 "R²SD 특징"에 대한 견고성 (Robustness), 보안성 (Security), 분산형 (Distribution), 지능형 (Intelligence), 통합형 (Integration), 가용성 (Availability), 보수성 (Maintainability)을 고려한 "R²S²FDAM 특징"이 원자력응용 실시간 컴퓨터 제어시스템의 프로토타입 개발에 적용되어 실시간 분산 제어시스템으로 개발이 수행된다. 원자력응용 실시간 제어시스템은 주로 프로세스 제어 태스크 (primary tasks)의 신뢰도 및 timeliness, 그리고 주제어실에서 진단 및 운전 태스크 (secondary tasks)의 supportness를 중요하게 다루며, 컴퓨터 제어시스템의 구현에는 주기적 (periodic), 비주기적 (aperiodic) 태스크의 스케줄링과 프로세스 통신에서의 성능 최대화를 중요하게 구현해야 한다. 로봇 제어를 위해서는 reactivity를 실시간 제어요건에 더 고려하여 설계되어야 한다. 그리고, 원자력발전소의 제어시스템 구현에는 최소한의 사고나 고장을 보장하기 위해 하드웨어 및 소프트웨어의 신뢰도를 최대화하는 시스템으로 설계되어야 하며,

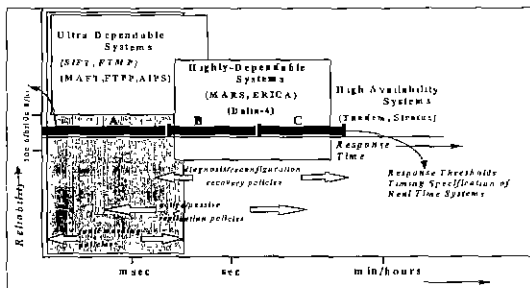


그림 2 실시간요건, 신뢰도, 사고복구 시간간의 연관관계

일반적으로 신뢰도 및 fault-tolerancy에 대한 상관관계는 그림 2와 같이 표현된다[1].

원자력응용 실시간 제어시스템의 자동제어 응용은 그림 2의 "A", 지능제어 및 모니터링 응용은 "B", 그리고 운전원의 의사결정을 위한 진단 및 지원 (Supports or Aids)는 "C" 영역으로 간주된다.

3. 관련 실시간 제어시스템

캐나다의 CANDU, 미국 ABB-CE의 System 80+, 프랑스 EdF의 N4, 영광 및 울진 등의 상용 원자력발전소의 계측제어시스템에서부터 미국 ORNL (Oak Ridge National Lab.)의 계측 제어 시험설비, 노르웨이 OECD Halden의 ISACS (Integrated Surveillance And Control System), 일본 도시바의 A-PODIA, 독일의 PRISCA, 한국전기술연구원의 차세대 주제어실 개념 등의 첨단 주제어실 개발을 위한 Pilot System에 이르는 운전원 제어를 위한 인간-기계 연계시스템이 널리 알려진다. 이들 중 비교적 최근에 개발되어 온 원자력발전소 계측제어시스템 및 주제어실의 Pilot System을 간략히 기술한다.

3.1 ISACS, Norway, Halden

ISACS는 전규모 (Full-scope) 가압경수로형 원자력발전소의 시뮬레이터를 기반으로 한 주제어실에서 운전지원시스템을 포함한 인간-기계연계시스템, 운전에서의 안전성 및 효율성 (Operational safety & efficiency)에 대한 운전원 성능, 그리고 주제어실의 실험평가를 위

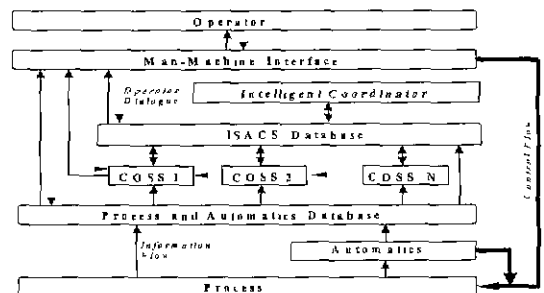


그림 3 ISACS의 시스템 구조

해 'HAMMLAB'으로 불리는 시험검증(Test & Evaluation) 설비의 CRT-기반 첨단(Advanced) 주제어실 프로토타입이다[15].

3.1.1 COSS(Computerized Operator Support Systems)

가압경수로형 시뮬레이터와 연결된 8개의 COSS는 각기 다른 운전원지원 Class를 가지며, ISACS 환경에서는 동일 레벨의 지원기능은 각 COSS에서는 서로 일치되는 기능을 수행하도록 설계되었다. HALO(Handling of Alarms using LOGics)는 타당치 않은 정보(Irrelevant alarms)를 회피하기 위해 프로세스 정보를 filtering하고 발전소 개관(Overview) 및 상세 프로세스 디스플레이에 정보를 표현하며, 발전소 시스템 및 그룹정보를 조정자(Coordinator)에게 제공하는 기능을 갖는다. 정보진단시스템인 DISCKET은 HALO로부터 정보정보를 입력받아 정보원인(Alarm causes)에 대한 가설(Hypothesis)을 생성하는 기능을 수행한다. DISCKET은 정보패턴 및 프로세스 변수들과의 매칭에 의해 추론하는 규칙-기반 지식시스템으로 구현되었다. C-E에서 개발된 CFMS(Critical Function Monitoring System)를 HAMMLAB의 ISACS의 경보시스템에 통합되어 임계안전함수를 진단하며, 운전원에게 디스플레이 형태로 진단결과를 표현한다. 그리고, 임계함수가 Geoparadise될 때에 운전원에게 가용한 액션계획(Available Action Plan)을 제공하는 SPMS(Success Path Monitoring System)도 HAMMLAB의 ISACS에 통합되어 임계함수에 대한 Success Path의 가용성(Availability)을 체크함으로써 평가하였다. 그리고, COPMA(Computerized OPERations Manual)는 원자력발전소의 운전절차서를 전산화하기위해 X-Window System을 이용하여 운전절차서를 개발하기위한 GUI 도구로써, 구조화된 운전절차서를 통해 시뮬레이터의 발전소 프로세스 데이터에 액세스하여 직접 프로세스 제어를 수행하는 기능을 갖는다.

3.1.1.2 IC(Intelligent Coordinator)

ISACS에서의 IC는 COSS를 슈퍼바이저하

고 제어하는 기능과 운전원 요구(Request)에 대한 Assessment를 수행하여 그 결과를 알려준다. 슈퍼바이저 및 제어기능은 발전소 상태에 따라 COSS로부터의 정보를 순위화(Prioritization)하여 발전소 개관 디스플레이에 전달하고 상세한 정보를 하위 순위를 갖는 디스플레이(2nd Level Process Display)를 운전원에게 제공하며, 운전원 요구에 대한 처리는 운전원의 요구를 해석하여 COSS에 전달하는 것과 운전원 요구의 각각(즉, 변화)에 따라 해당 COSS로 스위칭한다.

3.1.1.4 MMI(Man-Machine Interface)

인간-기계연계시스템은 컬러 그래픽 CRT, 키보드 및 트랙볼을 입출력 디바이스로서의 제어실을 구성하며, 1 또는 2인의 운전원과 1명 또는 무인 슈퍼바이저를 위한 'Cockpit Control Room'의 기능을 갖는다. 발전소 개관정보는 HALO overview, state identification, action planning & implementation, Rankine의 4개의 디스플레이로 구성되며, HALO 목록 및 경보 스크린, 발전소 운영을 위한 4개의 가압경수로형 시뮬레이터의 프로세스 계속제어 스테이션, COPMA 월스태이션, 3개의 COMBI (COMBind Information)/COSS로 구성된다.

3.2 N4, France

프랑스 EdF의 N4 원자력발전소는 신뢰도 높은 계속제어시스템 및 VDU-기반 주제어실을 설계한 상용 원자력발전소로 알려진다(그림 4). 계속제어시스템은 4 계층으로 설계되었으며, 주제어실에서의 운전원에 의한 제어는 정

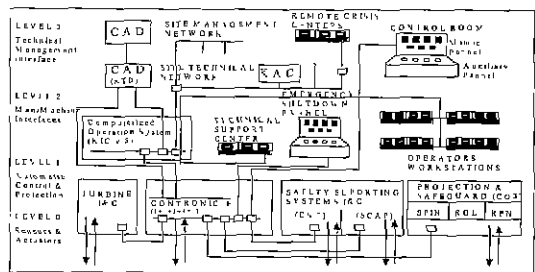


그림 4 N4 주제어실

concurrent process들간의 동기화를 구현한다. Touch-CRT, switch lamp, control devices, 그리고 controller prototype 등의 입출력 프로세스 제어를 위해 I/O handler를 구현한다(그림 7). 한편, task timing requirement를 시스템 클럭에 동기화하기 위해 "Interval Timer"를 사용한다. 개발되는 계층제어 하드웨어 및 소프트웨어의 시험검증 설비는 엄격 실시간 시스템인 원자력발전소의 safety-critical control softwares의 systematic V & V를 위한 기능요건을 만족하도록 개발되는 특징도 갖는다(그림 7).

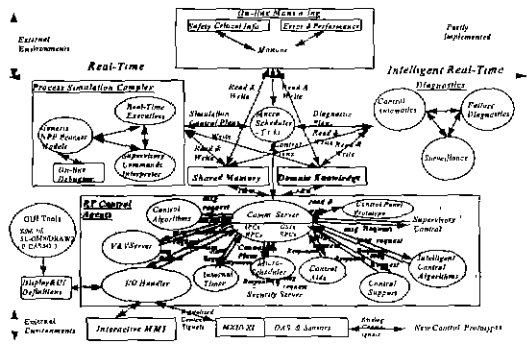


그림 7 계층제어 시험설비 시스템의 소프트웨어 구조

4.2 로봇 제어시스템

원자력 응용을 위한 지능형 이동로봇(Nuclear ROboT : NUROT)의 In-Door Navigation을 위한 제어시스템의 구현에 A. Meystel의 계층적 지능제어 개념을 적용하여, 자율형 navigation 실험을 수행하였다[19]. NUROT의 주요기능은 자율형/지능형, 지도-기반 navigation, 계층적 제어구조, 지능형 장애물 회피기능 및 자동 위치 인식기능, 원격제어, 그리고 그래픽 사용자 인터페이스이다.

4.2.1 계층적 지능제어

NUROT은 몸체 및 구동부 등을 구성하는 하드웨어, 그리고 지능제어 알고리즘 등의 소프트웨어는 모두 계층적 구조를 갖도록 설계되었다. NUROT이 목표지점에 도달하기 위한 경로산출은 Path Planner, Navigator, Pilot 등의 모듈이 계층구조를 유지하여 수행되고, 각각의

모듈은 IPC(Inter-Process Communication) 방식으로 정보가 제어된다. 계층적 소프트웨어는 UNIX 운영체제를 갖는 SUN Sparc 워크스테이션을 서버로, PC에 의한 actuation agent를 클라이언트로 하는 클라이언트-서버 환경에서 개발되었다(그림 8).

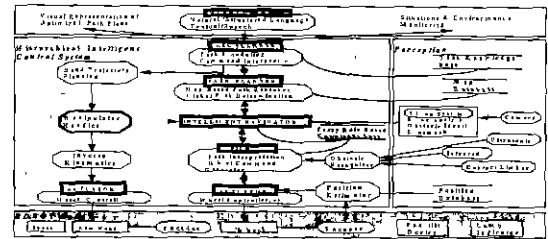


그림 8 NUROT의 계층적 지능제어시스템

4.2.2 장애물회피

NUROT의 장애물회피 기능은 지도상에 표시되지 않은 이동이 쉬운 내부시설물이나 움직이는 물체들은 초음파 센서에 의해 감지되고, 장애물의 위치나 거리, 그리고 형상을 인식하여 이를 피하여 주행하도록 설계되었다. 초음파 센서에 의해 감지된 인식정보 및 특징(feature)정보를 이용하여 퍼지로직에 의한 장애물 회피방법으로 구현되었다.

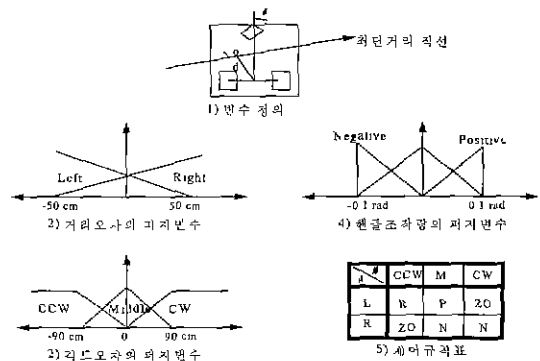


그림 9 NUROT 제어를 위한 퍼지제어 함수

4.2.3 위치 인식기능

NUROT이 자율적으로 목표지점에 도달하기 위해서는 현재의 위치를 정확하게 판단할 수 있어야 하는데, 이를 위한 NUROT의 위치판단 기능은 바퀴의 회전량을 연속적으로 감지하

여 이를 누적 가산함으로써 그 위치를 산출하는 사산법(Dead-Reckoning)을 사용하였다. 이 방법의 단점인 장거리 운행에서의 오차를 방지하기 위해 뉴럴네트워크를 이용한 미끄럼 보정 알고리즘[16] 및 이동 공간상에 landmark를 설치하여 NUROT이 이동중에 카메라를 통하여 위치보상을 수행하도록 한다. 원자력발전소의 격납용기 내부에서의 원자로 및 증기발생기 등의 점검(Inspection Task)을 수행하기 위해 안전지역에서의 NUROT 제어를 위한 원격제어판넬을 개발하였으며, 원자로 및 증기발생기의 mockup을 이용하여 기능검증을 수행중이다. 그리고, 지능 에이전트의 성능향상을 위해 실시간 운영체제, 제어 프로세스의 동기, 제어데이터의 실시간 처리, 그리고 reactivity를 개선중이다.

4.3 실시간 주제어실 모의시스템

주제어실에서 운전원의 의사결정 및 발전소 운전을 위한 인간-기계연계시스템의 개발 및 실험평가를 위해 high fidelity를 갖는 실시간 시뮬레이터가 요구된다. 한국원자력연구소에서는 차세대 주제어실 프로토타입의 운전성능 및 인간-기계연계시스템의 실험평가를 위해 VDU-기반 주제어실 모의시스템을 인간공학적 실험평가를 위한 기능도 만족하도록 개발중이다 [19]. 발전소 모의 호스트 컴퓨터(SGI INDY), 운전지원 컴퓨터(HP9000/750), 시험 및 평가 데이터의 해석컴퓨터(SGI W/S INDY 및 PC 서버), 그리고 인간-기계 인터페이스로 터치 X-터미널, 소프트 터치판넬, 키보드, 그리고 마우스를 입력 디바이스로하여 IEEE 802.3 표준에 따른 Ethernet 근거리 네트워크(Local Area Networks)를 이용하여 통신하는 개방형 클라이언트-서버 모델로 주제어실 모의시스템의 플랫폼을 구성하였다(그림 10).

그리고 실시간 모니터링 시스템, 운전지원시스템 등의 성능평가를 위한 인터페이스 기능이 고려되었으며, 신뢰도 높은 소프트웨어 개발도구(발전소 프로세스 모델, 사용자 인터페이스, 데이터 통신, 멀티미디어 데이터 처리, 그리고 실시간 데이터베이스 관리 등)를 이용하여 개발된다.

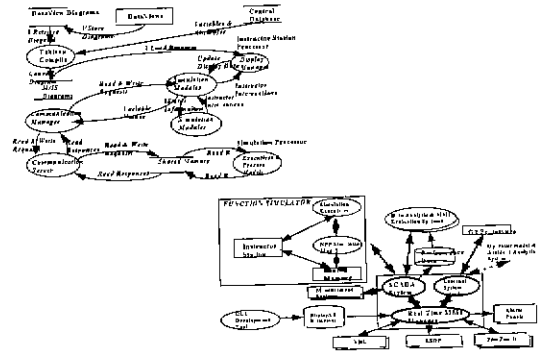


그림 10 주제어실 모의시스템 구조

4.3.1 발전소 프로세스의 실시간 모의

발전소 정적 모델에서부터 thermal hydraulics같은 동적 프로세스 모델, 운전 초기조건 및 모든 운전모드(startup으로부터 100% level power 및 100% level power로부터 cold shut-down), 그리고 100여개에 이르는 사고(malfunction)가 실시간 모의되었다. 실시간 시뮬레이션의 실시간 수행 및 제어를 위한 executive 시스템은 소프트웨어 배치, 발전소 변수 및 인간-기계 연계시스템의 초기화, 실시간 태스크의 스케줄링(Master Synchronization Task : MST), message requests의 처리를 위한 Real-Time Executive (RTEEXEC), 그리고 모의 데이터의 관리를 위한 Data Base Manager (DBM)가 구현되었다. 모의 프로세스 및 응용들은 실시간 프로세싱을 위해 공유기억장치를 액세스하며, IPC를 이용한 프로세스간 통신을 구현하였다.

4.3.2 On-Line 모니터링

터치 컬러 스크린을 이용한 발전소 프로세스에 대한 상태변수 및 안전함수, 대형정보화면을 이용한 프로젝트션 디스플레이로써의 발전소 개관정보, 200여개의 경보타일을 이용한 경보정보, 그리고 소프트 터치판넬을 이용한 주요 안전기능의 모의가 구현되었다. 이러한 실시간 프로세스 모니터링은 X-Designer 그래픽 에디터, C++, UIL(Interpreted Motif User Interface Language), device-independant X-Window 시스템 및 DataViews, Dynamic graphic

displays(XRT/GRAPH), 객체 라이브러리(XRT/TABLE)을 이용하여 설계되었다. 이러한 프로세스 모니터링 외에 운전원 성능평가를 위한 멀티미디어 데이터의 처리기능으로 TIFF, GIF, PCX, Targa, GEN 이미지 데이터를 클라이언트-서버간의 데이터 전달, 저장, 해석, 그리고 효율적인 관리를 위한 DB Browser가 구현되었다.

5. 결 론

원자력 응용을 위한 실시간 제어시스템의 개발에 개방형 컴퓨팅 환경을 이용하여 프로토타입을 개발하는 사례가 증가하는 추세이고, 동적 프로세스 모델의 fidelity 및 실시간 수행, 실시간 분산제어시스템의 고신뢰도, safety-critical 소프트웨어의 시험검증, 그리고 실시간 프로세스 모니터링의 구현을 위한 그래픽 presentation 및 대화식 사용자 인터페이스 구현기술이 더욱 요구된다. 원자력응용 실시간 제어시스템의 성능향상을 위해 실시간 운영체제인 DREAM Kernel[12], ARTS[3], 실시간 모니터링을 위한 GUI 도구로써의 PICASSO-3 및 SL-GMS[13], 지능형 에이전트로써의 운전지원시스템 개발을 위한 실시간 전문가시스템 셸 G2, 실시간 모의 데이터베이스의 관리 및 프로세싱을 위한 RT DBM[3], Oracle, Sybase, M²RTSS[9] 등을 검토 중이다. 그리고, 정보보안, 모니터링, 경보처리 및 운전지원 기능 등이 통합되는 주제어실의 인간-기계연계시스템이 최대의 신뢰도를 갖는 계층적 실시간 분산시스템으로 통합되어 원자력발전소의 안전성 및 운전성능을 높일 것으로 예측된다.

참고문헌

[1] N. Suri, C.J. Walter, and M.M. Hugue(Editors), "Advances in Ultra-Dependable Distributed Systems," IEEE Computer Society Press, 1995.
 [2] K.M. Zuberi and Kang G. Shun. "Non-Preemptive Scheduling of Messges on Controller Area Network for Real-Time Control

Applications," *Proceedings of Real-Time Technology and Applicaitons*, Chicago, Illinois, pp.240-249, May 15-17, 1995.
 [3] S. Son , "Developing a Database System for Time-Critical Applications," *In Database and Expert Systems Applications*(Edited by V. Marik, J. Lazansky, R. R. Wagner), pp.313-324, Springer-Verlag, 1993.
 [4] John A. Stankovic, et al., "Implications of Classical Scheduling Results for Real-Time Systems," *IEEE Computer*, pp.16-25, June 1995.
 [5] D. J. Musliner, et al., "The Challenges of Real-Time AI," *IEEE Computer*, pp.58-66, January 1995.
 [6] A. Kanevsky, P.C. Krupp, and P.J. Wallace, "Paradigm for Building Robust Real-Time Distributed Mission-Critical Systems," *Proceedings of Real-Time Technology and Applicaitons*, Chicago, Illinois, pp.33-40. May 15-17, 1995.
 [7] D. J. Mushner, E.H. Durfee, and Kang G. Shun, "CIRCA : Cooperative Intelligent Real-Time Control Architecture," *IEEE Tr. Systems, Man, and Cybernetics, Vol.23, No.6*, pp.1561-1574, November/December 1993.
 [8] S. Shik, Y.K. Kim, and Sang H. Son, "Performance Evaluation of a Firm Real-Time Database System," *IEEE Real-Time Systems ans Applications*, Tyoko, Japan. pp.115-124, December 1995.
 [9] S.K. Cha, et al., "Object-Oriented Design of Main-Memory DBMS for Real-Time Applications," *IEEE Real-Time Systems and Applications*, Tyoko, Japan, pp.109-115, December 1995.
 [10] M. Takegaki, "The Middleware Services for Industrial Computer Systems," *Proceedings of Real-Time Technology and Applicaitons*, Tyoko, Japan, pp.180-181, October 1995.
 [11] B. Hayes-Roth, "Architural Foundations for Real-Time Performance in Intelligent Agents," *In Second Generation Expert*

System(edited by J.M. David, et al.), Springer-Verlag, pp.643-672, 1993.

[12] 박찬모 외, "RTS 기술개발 : 제 1차년도," 과학기술처 연차보고서, 포항공과대학교, 1995년 9월.

[13] 권기춘 외, "원자력발전소 계측제어를 위한 시험검증기술 개발", *KAERI Annual Report* (Report No. KAERI/RR-1504/94), July 1995.

[14] P.J. Otaduy, et al, "Supervisory Control : Conceptual Design and Testing in ORNL's Advanced Controls Research Facility", *AI'91 : Nuclear Industry*, pp.170-179, 1991.

[15] N.T. Fordestrommen, et al., "ISACS-I : Man-Machine Interface and User Perspectives," *OECD Halden Reactor Project*, Report No. HWR-297, p.31, June 1991.

[16] 김재희, 조형석, "신경회로망을 이용한 이동 로봇의 위치추정에 관한 연구," 한국정밀공학회 추계학술대회, pp.177-182, 1992년 10월 31일.

[17] 이철기, "실시간 모의제어 시스템 (Simulator) 국산화 개발," 한국정보과학회지, 제13권 제4호, pp.76-80, 1995년 4월.

[18] 차경호, 이장수, 이재철, "자율형이동로봇의 In-Door Navigation," 한국정보과학회 춘계학술대회, pp.-, 1993년 4월 24일.

[19] 차경호, 오인석, 이현철, 심봉식, "개방시스템 환경을 이용한 원자력발전소 주제어실의 인간-기계연계시스템 평가를 위한 시험설비의 설계," 한국정보과학회 춘계학술대회, pp. 983-986, 1996년 4월 19일.

[20] Inn S. Kim, et al., "A New Surveillance and Diagnosis System for NORS Based on the MOAS II Methodology," *OECD Halden Reactor Project*, Report No. HWR-386, p.

53, October 1994.

[21] K. Sekmizu, et al., "A Knowledge-Based Supervisory Control of Highly Automated Nuclear Power Plant," Third International Topical Meeting on Nuclear Power plant : Thermal Hydraulics and Operations, pp.B6-31-B6-40, November 1988, Seoul, Korea.

[22] IAEA, "Nuclear Power plant Control And Instrumentation : Working Material," *Proceedings of the Regular Meeting of the International Working Group on Nuclear Power Plant Control and Instrumentation*, IAEA-IWG-NPPCI-94/3), Paris, p.240, 21-22 October 1993.

차 경 호



1982 경북대학교 전자공학과(공학사)
 1985 한국과학기술원 전산학과(공학석사)
 1985~현재 한국원자력연구소 연구원
 관심분야: Real-Time Intelligent Systems, CAD/CIM, VR

권 기 춘



1974~80 경북대학교 전자공학과, 학사
 1984~89 한국과학기술원 전산학과, 석사
 1993~현재 한국과학기술원 전산학과, 박사과정
 1980~현재 한국원자력연구소 계측제어연구팀 분야책임자
 관심분야: 고신뢰도 소프트웨어 검증 및 확인방법론, 인공지능기술 원전 적용, 실시간 시뮬레이션